

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**

**Кафедра електронних приладів та пристроїв**

**До захисту допущено**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д.Писаренко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття ступеня бакалавра

з спеціальності :

**6.050802 - Електроніка**

Спеціалізація:

**Електронні прилади та пристрої**

на тему **«Сенсор на основі еванесцентного поля»**

**Виконав:**

Студент 4 курсу, гр. ДЕ-51

**Гетун Н.Ю.**

\_\_\_\_\_

**Керівник:**

Доцент кафедри ЕПП, к.т.н.

**Чадюк В.О.**

\_\_\_\_\_

Нормоконтроль:

Доцент кафедри ЕПП, к.т.н.

**Чадюк В.О.**

\_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор кафедри

промислової електроніки, д.т.н. **Ромашко В.Я.**

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ-2019

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.050802 –

Електронні пристрої та системи (Електронні прилади та пристрої)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д.Писаренко

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломну роботу студенту

**Гетуну Назару Юрійовичу**

**1. Тема роботи «Сенсор на основі еванесцентного поля»**

і керівник роботи Чадюк В'ячеслав Олексійович, доцент, к.т.н.

затверджені наказом по університету від 27 травня 2019 р., № 1405-с

**2. Термін подання студентом роботи : 4 червня 2019 р.**

**3. Вихідні дані до роботи:** Джерело випромінювання світлодіод(з широким спектром випромінювання); безоболонкове багатомодове оптичне волокно з нанесеними на нього брегівськими ґратами; фотодіод для контролю потужності випромінювання світлодіода;.

**4. Зміст роботи:** Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури фізичних основ еванесцентного поля; огляд різних видів еванесцентних сенсорів та перспективних напрямків їх використання; технології виготовлення, характеристики та параметри ключових елементів схеми; опис структурної схеми сенсора на основі еванесцентного поля та розрахунок чутливості до температури сенсора; висновки; перелік використаної науково-технічної літератури.

**5. Перелік ілюстративного матеріалу:** Структурна схеми пристрою, плакати з рисунками.

**6. Дата видачі завдання : 20.02.2019 р.**

## ***КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН***

<b>№ з/п</b>	<b>Назва етапів виконання дипломної роботи</b>	<b>Термін виконання етапів роботи</b>	<b>Примітка</b>
1	Огляд науково-технічної літератури по фізичним основам еванесцентного поля.	20.03.2019	
2	Огляд різних видів еванесцентних сенсорів та перспективних напрямків їх використання	30.03.2019	
3	Розробка структурної схеми сенсора	10.04.2019	
4	Дослідження параметрів сенсора	20.04.2019	
5	Розрахунок чутливості еванесцентного сенсора	30.04.2019	
6	Оформлення графічної частини, пояснювальної записки, плакатів, підготовка доповіді	27.05.2019	

*Студент гр. ДЕ-51*

*Н.Ю.Гетун*

*Керівник роботи*

*В.О.Чадюк*

# РЕФЕРАТ

## «Сенсор на основі еванесцентного поля»

Дипломна робота освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності 6.050802.- Електроніка, спеціалізації – Електронні прилади та пристрої. **Гетун Назар Юрійович**. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-51. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2019. – 43 с., іл. 7 , табл. 1.

**Ключові слова:** Еванесцентне поле, Бреггівські ґратки, Оптичне волокно, Оптика ближнього поля, Спектр випромінювання, Світлодіод.

**Короткий зміст роботи:** В дипломній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по фізичним основам еванесцентного поля. Показані різні види сенсорів на основі еванесцентного поля, використання їх в мікроскопії, інтегральній оптиці, оптичних волокнах, при надщільному записі інформації. Розглянуті основні елементи структурної схеми сенсора на основі еванесцентного поля, їх параметри та характеристики, а також технології їх виготовлення. Розроблений сенсор на основі бреггівських ґраток та еванесценного поля. Представлена структурна схема даного сенсора. Розрахована чутливість сенсора до температури.

## **АНОТАЦІЯ**

Метою цієї роботи є дослідження особливостей евенесцентного поля та його застосування в різних сферах, таких як: мікроскопії, оптоволоконних приладах, для запису інформації на диски та в інтегральній оптиці. Окрім того, було досліджено оптичні волокна, їх властивості, порівняно їх основні типи та розглянуто технології виготовлення їх у промисловості. Також в ході роботи було зроблено огляд та порівняння різних видів напівпровідникових елементів, таких як світлодіоди та фотодіоди. Після цього було розглянуто основні властивості Брегівських ґраток та їх застосування в електроніці. Це було важливим та необхідним кроком для подальшої розробки різних сенсорів, що мають чутливість до температури, тиску, механічного розтягування та інших видів зовнішнього впливу.

## **S U M M A R Y**

The purpose of this work is to study the features of the evenescent field and its application in various sphere such as: microscopy, fiber optic devices, for recording information on disks and in integrated optics. In addition, the optical fibers, their properties, their basic types and their manufacturing technologies in the industry were investigated. In the course of the work, a review and comparison of various types of semiconductor elements, such as LEDs and photodiodes, was made. After that, the main properties of the Bregg grating and their application in electronics were considered. This was an important and necessary step for the further development of various sensors which have sensitivity to the temperature, pressure, mechanical stretching and other types of external influences.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>РОЗДІЛ 1. Фізика еванесцентного поля.....</b>	<b>5</b>
1.1 Еванесцентні хвилі.....	5
1.2 Використання еванесцентних полів в оптиці.....	7
1.3 Проблеми, що сповільнюють прогрес розвитку мікроскопії ближнього поля.....	13
1.4 Еванесцентне поле у волокнах.....	13
1.5 Перспективи використання оптики ближнього поля для надщільного запису інформації.....	15
1.6 Еванесцентні поля в інтегральній оптиці.....	17
<b>РОЗДІЛ 2 Огляд ключових елементів схеми еванесцентного сенсора.....</b>	<b>20</b>
2.1 Оптичні волокна, порівняння основних типів оптоволокна та сучасні технології виготовлення оптичних волокон в промисловості.....	20
2.1.1 Багатомодові та одномодові волокна.....	20
2.1.2 Технологія виготовлення оптичних волокон.....	22
2.2 Основні параметри та характеристики фотодіодів.....	25
2.3 Огляд різних типів світлодіодів, порівняння їх якісних характеристик та технологія виготовлення світлодіодів.....	30
2.4 Основні процеси виробництва світлодіодів .....	32
2.5 Волоконно оптичні датчики на бреггівських ґратках.....	35

					БР.6.050802.051.006 ПЗ			
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Дата				
Розроб		Гетун Н. Ю.			Сенсор на основі евенесцентного поля	Літ	Арк	Архивнів
Перевір		Гетун Н. Ю.						43
Реценз.						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-51		
Н. Контр		Чалюк В. О.						
Затверд		Писаренко						

<b>РОЗДІЛ 3 Розробка волоконно-оптичного еванесцентного сенсора та розрахунок чутливості сенсора.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Описання структурної схеми еванесцентного сенсора.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2 Розрахунок чутливості еванесцентного         сенсора.....</b>	<b>38</b>
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>41</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>42</b>

					<i>БР.6.050802.051.006 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасні темпи розвитку електроніки потребують розвитку новітніх технологій квантового контролю і маніпуляцій з наноб'єктами, що можуть бути носіями квантової інформації. Інтенсивна розробка таких нанотехнологій значно розширює наше уявлення про фізичні закономірності наносвіту. Велике значення в подібних експериментальних дослідженнях має взаємодія еванесцентних хвиль з різними квантовими наноб'єктами (окремими атомами або молекулами, нанодротом і т.д.). Також варто зазначити що еванесцентне поле пов'язане з будь-якою поверхнею і присутнє навколо всіх макроскопічних об'єктів.

Технології мікроскопії ближнього поля дозволяють збуджувати на виході субхвильового зонду сильно локалізовані еванесцентні поля, які при взаємодії з наноб'єктами перетворюються в фотони, що вільно рухаються. В наш час такі технології використовуються в різноманітних сферах, таких як мікроскопія, нанолітографія, запис та збереження інформації, вивчення біологічних наносистем, маніпуляцій з квантовими точками в напівпровідниках, а також дослідження фундаментальних питань взаємодії світла з окремими атомами та молекулами. Параметри перевипромінюваних фотонів дозволяють отримувати унікальну інформацію про будову і фізичні властивості речовин з нанометровими розмірами.

Моніторинг фізичних, хімічних і біологічних параметрів у природних умовах має велике значення для захисту екосистем. Волоконно-оптичні датчики пропонують численні переваги перед електричними перетворювачами завдяки їх невеликим розмірам, високій чутливості та можливості різноманітних вимірювань. Зокрема, сенсори на оптичному волокні з використанням брегговської решітки привернули значну увагу. Бреґівська ґратка - простий чутливий елемент, що може бути фотоіндукований в оптичне волокно. Особливий інтерес представляє

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



використання брегівських ґраток як хімічних і біологічних сенсорів, де зміна довжини хвилі індукується зміною складу навколишнього середовища в якому розташовано датчик і виявленням зміни довжини Брегівських хвиль.

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1. ФІЗИКА ЕВАНЕСЦЕНТНОГО ПОЛЯ

### 1.1. Еванесцентні хвилі

Еванесцентні хвилі (від лат. *evanescentis* – зникаючі) – це затухаючі хвилі, які виникають біля межі розподілу двох діелектриків і які рухаються вздовж межі. Ці хвилі відомі ще з дослідів Ньютона по повному внутрішньому відбиттю. Основна особливість цих хвиль полягає в тому, що вони загасають експоненціально з відстанню. Еванесцентне поле зосереджено на відстані менше половини довжини хвилі оптичного, акустичного або електромагнітного випромінювання. Схематичне зображення еванесцентного поля зображено на рис 1.1.

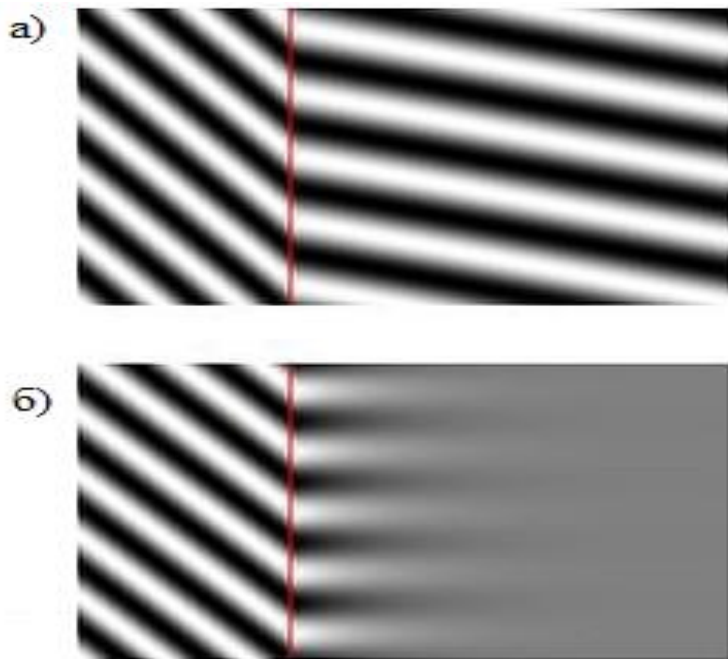


Рис. 1.1. Схематичні зображення заломленої хвилі (а) та еванесцентного поля за повного внутрішнього відбиття світла (б)

Еванесцентні хвилі з'являються в оптичних хвилеводах та призмах як явище порушення повного внутрішнього відбиття і тунелювання

електромагнітного поля в область, заборонену з погляду геометричної оптики. Ці хвилі стоячі, так як утворені полем молекул електричних диполів, які впорядкувалися у стаціонарну періодичну структуру полем світлової стоячої хвилі. Ця хвиля виникає внаслідок накладання двох хвиль – падаючої та відбитої, а її просторовий період  $\Lambda$  визначається кутом падіння світла  $\theta$  на поверхню повного внутрішнього відбиття

$$\Lambda = \lambda / (2n \sin \theta), \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла у вакуумі;  $n$  - показник заломлення середовища, в якому відбувається відбиття. Електричне поле цієї поляризує молекули скла й утворюються молекулярні електричні диполі, що орієнтуються дипольними моментами паралельно поверхні скла і кожен з них має у перпендикулярному напрямку поле

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{p}{x^3}, \quad (1.2)$$

де  $\epsilon$  – діелектрична проникність скла.

Якщо світло падає під кутом повного внутрішнього відбиття на менш щільне середовище, то у напрямку  $x$ , що перпендикулярний до межі, еванесцентне поле спадає експоненціально.

$$E_x = E_0 \exp\left(-\frac{x}{d}\right), \quad (1.3)$$

де  $d$  – глибина проникнення еванесцентного поля із середовища, що має показник заломлення  $n_1$ , у менш щільне середовище з показником заломлення  $n_2$ :

$$d = \frac{\lambda}{2\pi(n_1^2 \sin^2 \theta_0 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (1.4)$$

$$\theta_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.5)$$

Уздовж поверхні поля його амплітуда синусоїдально змінюється з просторовим періодом  $\Lambda$ .

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливості еванесцентних хвиль:

- поширюються поблизу пласкої границі розподілу в одному з середовищ (менш щільному);
- стаціонарність, хвиля стояча і електромагнітну енергію не переносить (вектор Пойнтинга дорівнює нулю);
- виникають на границі двох діелектриків;
- поле прив'язане до поверхні повного внутрішнього відбиття, причому у напрямку від поверхні відбувається експоненціальний спад електричного поля;
- завдяки близькості еванесцентного поля до поверхні це допомагає відображенню у ньому фізичних властивостей поверхні з високою деталізацією на рівні атомів;
- кут  $\theta$ , під яким світло падає на межу розподілу, повинен бути більший або рівний куту повного внутрішнього відбиття;
- якщо на поверхні повного внутрішнього відбиття є мікронерівності або неоднорідності, то це може зробити з еванесцентної хвилі хвилю поширення.

## 1.2. Використання еванесцентних полів в оптиці

Класична оптична мікроскопія має хорошу спектральну і часову вибірковість, але її роздільна здатність фізично обмежена за критерієм Релею дифракційною межею  $d = \lambda / (2n \sin \theta)$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі світла,  $n$  - показник заломлення середовища,  $\theta$  – апертурний кут, при якому немає можливості розрізнити дві точки зразка (у хороших мікроскопів цей кут близький до  $90^\circ$ ).

Дифракційна межа накладає суттєві обмеження на використання класичних мікроскопів при роботі з малими об'єктами. У таких мікроскопів

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вона досягає половини довжини хвилі  $d = 200\text{--}400$  нм і цього недостатньо для роботи з нанооб'єктами.

Атомно-силові мікроскопи, сканувальні тунельні мікроскопи та електронні мікроскопи дають роздільну здатність менше 10 нм, але вони не мають спектрального розширення, дають мало інформації про динамічні властивості випромінюючих молекулярних структур і потребують спеціально виготовленого зразка (з високою чистотою поверхні) і створення високого вакууму. В електронному мікроскопі немає можливості маніпулювати зразком.

У сканувальних тунельних та атомно-силових мікроскопах накладаються сильні обмеження на зразок (тверде покриття, чиста і рівна поверхня).

У процесі вивчення фізичних властивостей поверхні речовини з нанометровою деталізацією велику увагу приділяють мікроскопії ближнього поля. Мікроскопія ближнього поля має переваги як класичного оптичного мікроскопа, так і сканувально-тунельних та атомно-силових мікроскопів, які мають високу роздільну здатність.

Основна ідея мікроскопу ближнього поля вперше була сформульована у 1928 р. Схема скануючого оптичного мікроскопа зображена на рис. 1.2 .

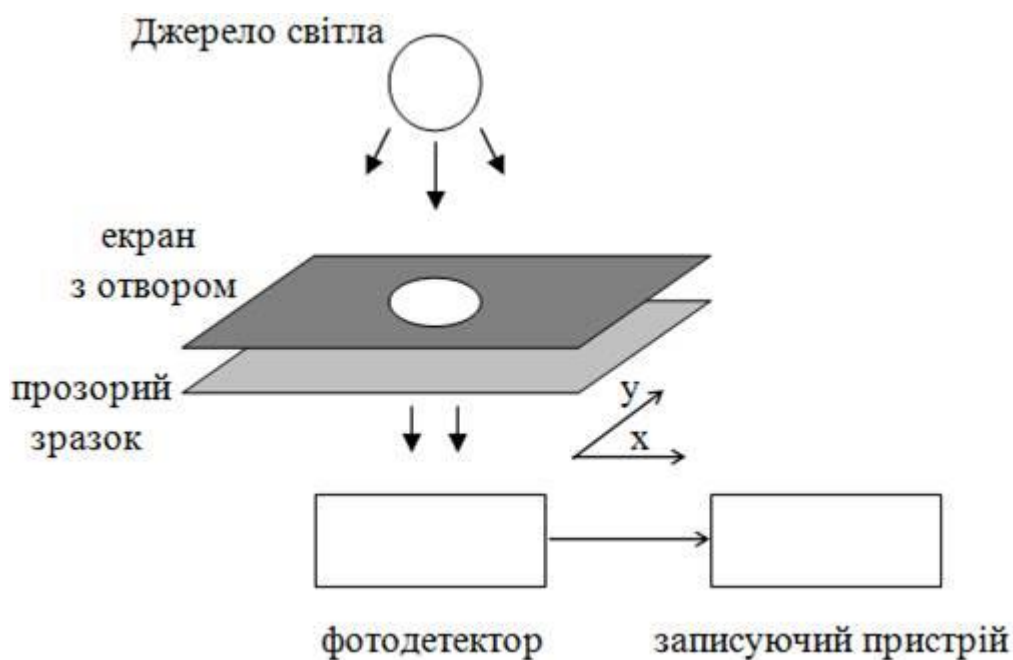


Рис. 1.2. – Схема скануючого оптичного мікроскопа, запропонована у 1928р.

У наш час дані мікроскопи активно використовуються у вирішенні прикладних задач фізики поверхні і мікроскопії надвисокої роздільної здатності, літографії, запису та збереження інформації, дослідженні полімерів, біологічних наносистем, квантових точок, а також у вивченні фундаментальних питань взаємодії світла з атомами і молекулами на поверхні різних речовин. Повна схема установки зображена на рис.1.3. [1]

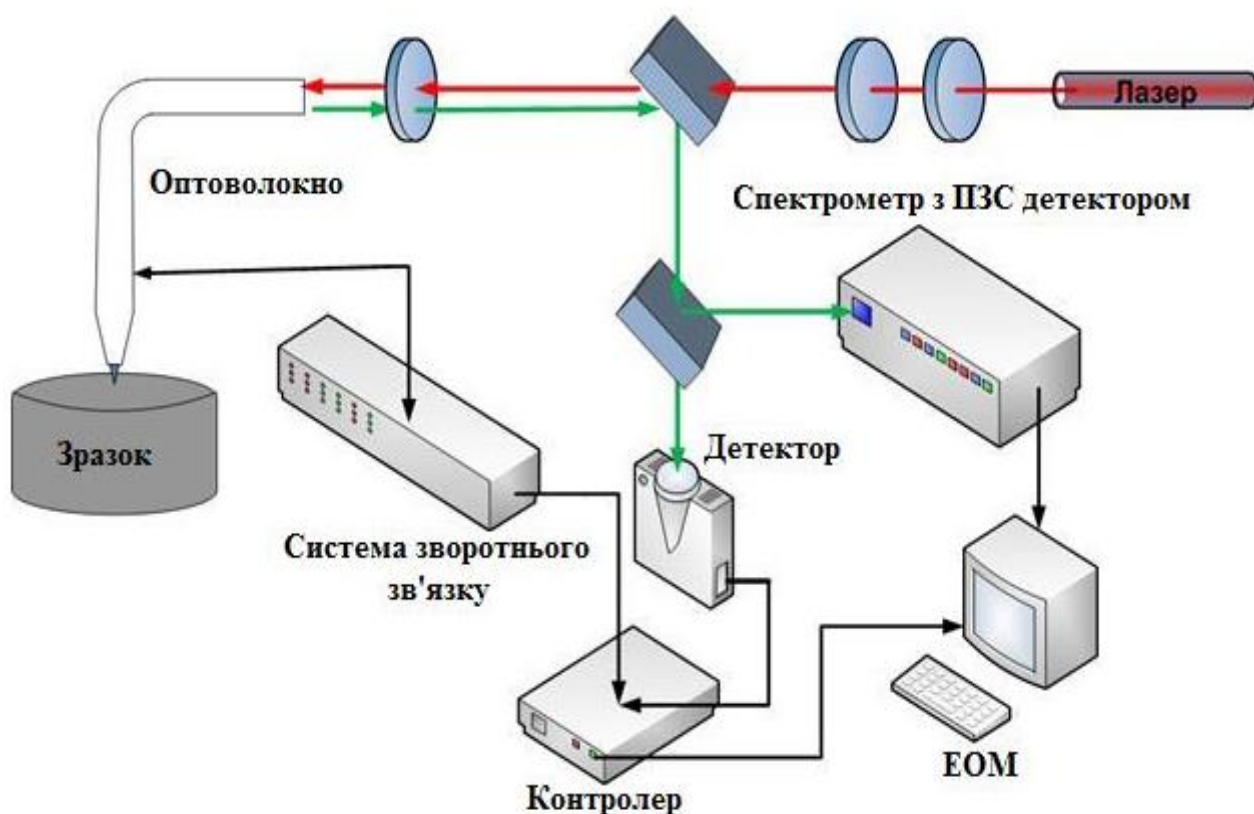


Рис. 1.3. Схема установки для мікроскопа ближнього поля

Конструкція мікроскопу ближнього поля містить такі елементи: Джерело світла(лазер), систему зворотнього зв'язку, скануючий зонд, фотодіод та пьезоелектричну платформу. Принцип роботи та вигляд ззовні скануючого оптичного мікроскопу ближнього поля показаний на рис.1.3.

Лазер що випромінює світло, фокусується на оптоволокні та проходить через поляризатор, світлодільник та прибор зв'язку. Світлодільник та поляризатор служать для відділення розсіяного світла від зворотно відбитого світла. [2]

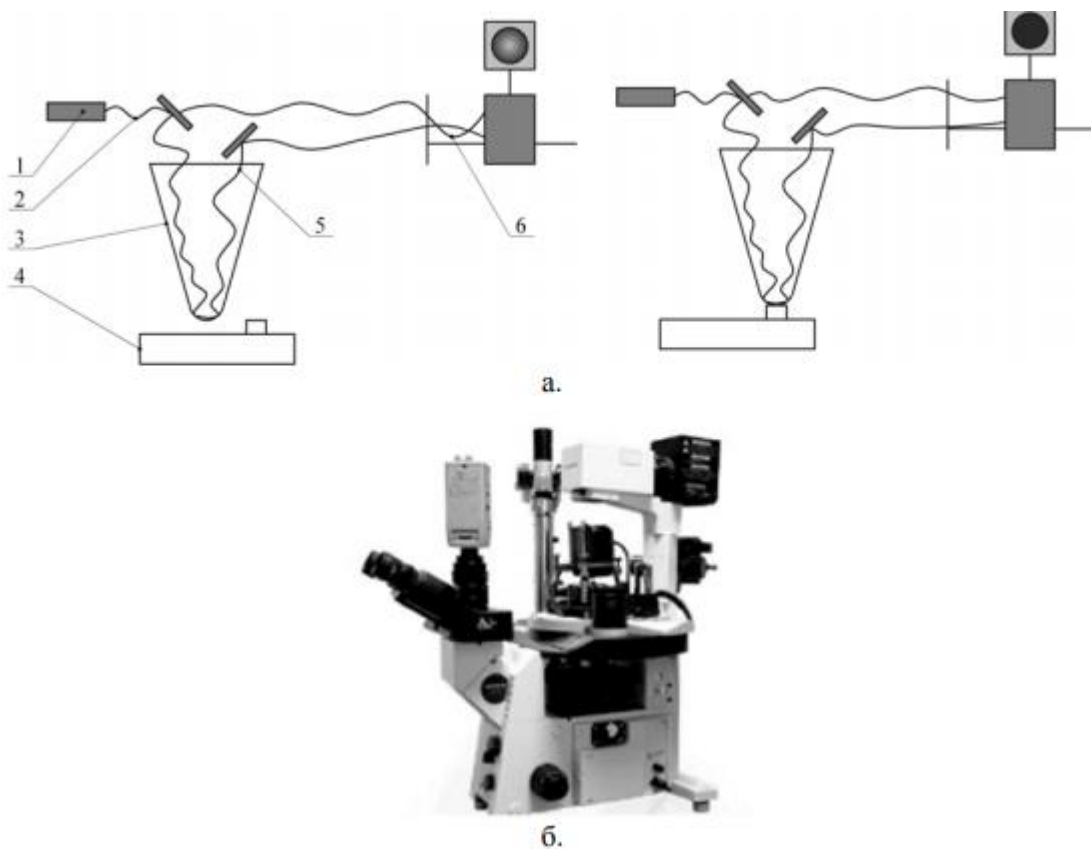


Рис. 1.3. - Принцип роботи (а) та вигляд ззовні (б) скануючого оптичного мікроскопу ближнього поля: 1 – лазер; 2 – промінь лазера; 3 – оптоволокно; 4 – зразок що досліджується; 5 – відбите світло від вільного кінця хвильоводу; 6 – фотодіод

Існує багато модифікацій мікроскопів ближнього поля. В найпоширенішому варіанті світло з довжиною хвилі  $\lambda$  через оптоволокно попадає на зонд, що має форму конуса, покритого металом. На кінці зонда знаходиться отвір з діаметром значно меншим  $\lambda$ , що дозволяє фокусувати світло на поверхню речовини з площею  $S \ll \lambda^2$ , розміщуючи зонд достатньо близько над речовиною, що показано на рис. 1.4. [1]

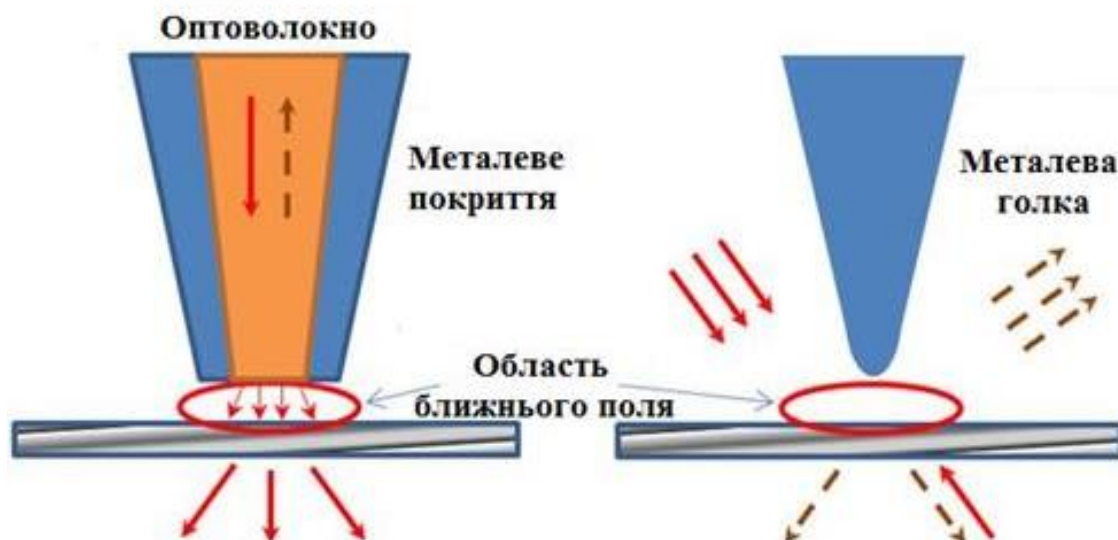


Рис. 1.4. Схеми апертурного та безапертурного мікроскопів ближнього поля

У випадку використання апертурного мікроскопу ближнього поля, використовується мала апертура на кінці оптичного волокна, вкритого металом. Світло рухається по волокну і опромінює невелику площу біля торця волокна. В такому випадку роздільна здатність мікроскопу визначається діаметром апертури (10–100 нм). У безапертурному варіанті ближнє поле створюється опроміненим кінцем металевої голки. Роздільна здатність мікроскопу наближається до атомних масштабів та вимірюється радіусом кривизни кінця металевої голки.

Переміщуючи зонд вздовж поверхні, можна реалізувати роздільну здатність, яка не обмежена дифракцією. Просторове розміщення зонда контролюється з високою точністю методами, які також використовуються в атомно-силовій мікроскопії. В більш загальній конфігурації зразок знаходиться на вершині напівсферичної підкладки.

Можливість нанометрової просторової локалізації світла виникає завдяки існуванню в зонді еванесцентного поля, яке нерозривно пов'язано з поверхнею зонда. Завдяки сильному просторовому стисненню еванесцентне



світло може взаємодіяти з малою кількістю квантових об'єктів, що знаходяться біля субхвильового отвору.

Еванесцентні поля при взаємодії з нанооб'єктами можуть бути поглинуті, або почати збуджувати флуоресценцію і перейти в фотони, що вільно поширюються в залежності від характеристик падаючого світла і зразка.

Параметри перевипромінених фотонів дозволяють отримувати унікальну інформацію про будову і фізичні властивості речовин з манометровим рельєфом.

Поперечні розміри звуженої частини субхвильового зонду (близько 100 нм) менші за мінімальний радіус, при якому більшість мод перестають поширюватись в оптоволокну (коли відбувається відсічка мод), тому тільки мала частина енергії поля виходить до вихідного отвору. Як наслідок, зонд погіршує поляризаційні характеристики вихідного випромінювання і змінює спектральні властивості еванесцентного поля, яке пов'язане з зондом і взаємодіє з об'єктом. Тому зображення являється сумішшю інформації про зразок та зонд. У випадку, коли зонд набагато більший об'єкта, що аналізується, зображення матиме більше інформації про зонд чим про деталі будови об'єкта.

Суміш цих факторів приводить до того, що в залежності від геометрії зонда та типу експерименту, отримане зображення зразка може сильно відрізнятись від реального. Для покращення роздільної здатності і правильної інтерпретації інформації отриманої з експериментів (зображень з поверхні та відклику з об'єкту), необхідно добре знати параметри локалізованого еванесцентного світлового поля, взаємодіючого зі зразком. Для цього, перед усім потрібно знати просторову структуру і поляризацію світлового поля на виході із зонда і в ближній зоні.

Однак діаграма випромінювання поля на виході зонда має сильно розбіжний характер, тому експериментальні результати по вимірюванні

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

еванесцентного поля показують, що світлове поле в зонді набуває незвичайні просторові властивості, які потребують більш глибокого теоретичного аналізу. Однак такі важливі параметри, як поляризація, просторова структура світлового поля на виході з зонда, просторове розширення і контрастність отриманого зображення залишаються величинами, що погано піддаються теоретичному аналізу із-за складності геометрії.

### **1.3. Проблеми, що сповільнюють прогрес розвитку мікроскопії ближнього поля**

На жаль, до цього часу поведінка світлового поля в зонді біля вихідного отвору залишається мало дослідженою. Недостатньо зрозумілим є вплив форми і фізичних параметрів зонду на поширення світлового поля і формування його просторової структури поблизу вихідного отвору субхвильового зонду. Відсутність необхідного розуміння і фізичних даних про закономірність реалізації сильної просторової локалізації світлового поля в зонді, значно обмежує прогрес в розвитку мікроскопії ближнього поля і є одною з основних фізичних проблем в мікроскопії ближнього поля.

Іншою важливою проблемою оптики ближнього поля є низька пропускна здатність зонду ( $10^{-3}$ – $10^{-4}$ ), яка стає одним з основних факторів, що обмежують просторове розширення і погіршує поляризаційні та спектральні характеристики вихідного випромінювання.

Дослідження цих проблем дозволить запропонувати оптимальні розміри зонду, що дозволять максимально зменшити розмір світлової плями та збільшити при цьому інтенсивність світла.

### **1.4. Еванесцентне поле у волокнах**

					<i>БР.6.050802.051.006 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптичне волокно — це фізичне середовище для транспортування оптичного сигналу, яке складається із серцевини та оболонки, що мають різні величини показників заломлення. Завдяки явищу повного внутрішнього відбиття випромінювання на межі більш щільного та менш щільного середовища, можливо транспортувати оптичні сигнали, що генеруються обладнанням, до якого підключене оптичне волокно.

Під час відбиття світлової хвилі від межі серцевини та оболонки частина електромагнітних хвиль долає цю межу і швидко згасає в оболонці в поперечному напрямку, але продовжує поширюватись разом з модою волокна вздовж поверхні серцевини. Так відбувається оптичний тунельний ефект – подолання світловою хвилею потенціального бар'єру на межі двох середовищ та створення за потенціальним бар'єром поля, що спадає експоненціально (еванесцентного поля). Тунельний ефект – явище виключно квантової природи, неможливе в класичній механіці. Причиною виникнення даного поля є збудження світловою хвилею, що потрапляє в середовище, коливань електронів середовища, тобто утворення коливальних електричних диполів.

Також тісно пов'язаний з оптичним тунельним ефектом ефект Гуса-Хенхена, явище повздовжнього зміщення променя лінійного поляризованого світла в умовах повного внутрішнього відбиття від межі розподілу двох діелектричних середовищ з різними показниками заломлення. Для великого кута падіння зсув світлового променя може бути більшим довжини хвилі випромінювання .

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

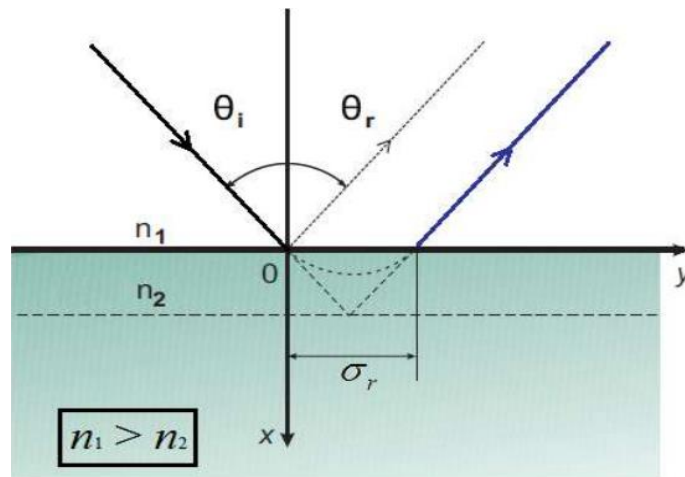


Рис. 1.5. Демонстрація ефекту Гуса–Хенхена

Втрати у волокні з оболонкою визначаються не тільки матеріалом серцевини, а також і матеріалом оболонки. Тобто при тоншій серцевині волокна, велика частина потужності буде випромінюватись за її межами.

Оболонка у волокні має свої позитивні та негативні сторони, вона, наприклад, захищає серцевину від пошкодження та забруднення, запобігає паразитному зв'язку у волоконному джгуті між прилеглими волокнами, але також зменшує частину вхідної потужності, що подається на серцевину. [3]

Для того щоб ввести у волокно ще більше світла, потрібно забезпечити великі значення  $n$  та  $\Delta n$ . Найкраще, що можна зробити, це виготовити скло з великим показником заломлення та не покривати його оболонкою. У цьому випадку повне внутрішнє відбиття буде відбуватись на поверхні скло-повітря. Жмути з непокритих оболонкою скляних волокон використовувалися в деяких системах передачі оптичної інформації на коротку відстань. Але використання таких жмутів обмежують еванесцентні хвилі. При повному внутрішньому частина хвилі світла проникає через відбиваючу поверхню.

Амплітуда еванесцентної хвилі зменшується з збільшенням відстані від поверхні волокна і тому зазвичай не може поширюватись в середовищі з більш низьким показником заломлення. Але наявність різних нерівностей та

неоднорідностей на відбиваючій поверхні може призвести до перетворення затухаючої хвилі (еванесцентної) в хвилю поширення. У жмуті волокон без оболонки умови на відбиваючій поверхні змінюються безконтрольно, так як окремі волокна входять в контакт один з одним і навколишнім середовищем. В результаті цього значна частина потужності втрачається. [4]

### **1.5. Перспективи використання оптики ближнього поля для надщільного запису інформації**

Ще не так давно вважалось, що межу в оптиці для роздільної здатності оптичних приладів встановлює критерій Релея, тобто мінімальний розмір, який можна розрізнити, трохи менший за довжину хвилі світла, що використовується та обмежений дифракцією випромінювання. Звичайні оптичні диски, які зараз використовуються для запису та зчитування інформації (DVD диски), пропонують максимальну щільність запису інформації – декілька гігабіт на квадратний дюйм.

Для зчитування та запису використовується червоний лазер з довжиною хвилі близько 650 нм. Покращення характеристик систем оптичного запису інформації пов'язане з використанням лазерів з хвилями меншої довжини. Так в 2006 році був розроблений новий формат дисків Blu-ray, в якому використали синій лазер з довжиною хвилі 405 нм, що дозволило суттєво підняти щільність запису інформації.

Але останнім часом все більшу увагу викликає можливість формування і вивчення оптичними методами різних структур нанометрових розмірів, що у 10–20 разів менші за довжину хвилі світла. Це стало можливим завдяки розвитку ближньопольової оптики (БПО) — дуже перспективного напрямку прикладної і фізичної оптики. З фізичної точки зору БПО ґрунтується на присутності у дальній зоні випромінювання слідів взаємодії світла з

					<i>БР.6.050802.051.006 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікрооб'єктом, які можна ідентифікувати, що є у ближньому полі, яке розміщене на відстанях менших за довжину хвилі в декілька разів. Тобто БПО поєднує деякі моменти звичайної оптики та зондової сканувальної мікроскопії.

Використання БПО для запису та зчитування інформації з використанням плями лазера в 30 нм дозволить записати на диск звичайних розмірів інформацію близько 200 Гб, що в рази більше, ніж у сучасних DVD та Blu-ray дисках, можуть запропонувати. Однак використання цієї технології обмежують декілька проблем. Одна з них – це використання металізованого зонду в пристроях зберігання даних, тому що зонд не може сканувати на великих швидкостях. Пристрої, що базуватимуться на одному гнучкому зонді, не матимуть потрібної пропускної здатності приводного механізму для підтримання необхідної відстані між кінцем зонду і носієм. Тому як вирішення цієї проблеми можливо застосувати велику кількість зондів, тобто кожен зонд буде сканувати лише невелику ділянку, що збільшить швидкість обробки даних і переходи між блоками даних будуть займати менше часу.

Підсумовуючи ближньопольовий запис інформації є надзвичайно перспективним у зв'язку з постійно зростаючими потребами людства в збільшенні об'ємів носіїв інформації.

На даний момент, дослідження в цій сфері дають змогу зробити деякі висновки:

- за допомогою ближньопольової оптики можна щільно записувати інформацію на поверхню носіїв;
- розмір світлової плями може бути набагато меншим за довжину хвилі світла;
- існують розроблені модифікації зондів ближнього поля, що можуть збільшити швидкість запису та зчитування інформації;

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- щільність запису інформації на диски, на які проводиться запис з допомогою ближньопольової оптики, в багато разів більша, чим в сучасних аналогів, та в перспективі може бути збільшена. [5]

## 1.6. Еванесцентні поля в інтегральній оптиці

Присутність еванесцентних полів також можна спостерігати в інтегральній оптиці на прикладі двох канальних хвильоводів, розташованих на субмікронній відстані один від одного. Два хвильоводи розміщують так, щоб вони знаходились дуже близько один біля одного і створюють умови, що необхідні для зв'язку за рахунок фазового-когерентного переходу енергії (оптичного тунелювання). При цьому показники заломлення шарів хвильоводів повинні бути більші, ніж у проміжного шару та підкладки, а також товщина проміжного шару повинна бути дуже малою, щоб перекривались експоненціальні «хвости» мод, що поширюються у хвильоводах, тобто відбувається перекачка магнітної енергії з одного хвильоводу в інший за рахунок еванесцентного поля. Щоб перекачка енергії відбулась, вони повинні мати однакові сталі поширення. Таким чином, сталі, показники заломлення і товщини хвильоводів повинні контролюватися, щоб забезпечити узгодження постійних поширення. Використання такого важкого методу дає хороші результати. Для досягнення оптимального узгодження потрібно правильно вибирати довжину взаємодії.

Такий метод зв'язку важко використовувати для хвильоводів що отримані нанесенням тонких плівок, так як така технологія не дозволяє з потрібною точністю контролювати отримані величини показників заломлення і товщини хвильоводів. Але в випадку епітаксially вирошених хвильоводів при наявності дуже точного контролю товщин та показників заломлення (за рахунок контролю вмісту) проблему узгодження постійних поширення вирішити набагато легше.

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Двохканальні спрямовані відгалужувачі складаються з двох паралельних канальних оптичних хвильоводів, вони розміщені так близько один до одного, що енергія між ними може передаватись еванесцентним полем, хоча цього і не повинно відбуватись так як хвильоводи утримують енергію в собі.

Такий перехід енергії забезпечується за рахунок зв'язку в умовах когерентності і синхронізації між перекриваючими експоненціальними «хвостами» мод, каналізованих в кожному з хвильоводів. Фотони моди, що поширюється в одному з хвильоводів, переходять в моду що поширюється в іншому хвильоводі, зберігаючи фазову когерентність під час такого переходу. Для досягнення такого синхронного зв'язку світло повинне поширюватись з однаковою фазовою швидкістю у кожному з каналів. [3] [6]

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## РОЗДІЛ 2. ОГЛЯЛ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ ЕВЕНЕСЦЕНТНОГО СЕНСОРА

### 2.1. Оптичні волокна, порівняння основних типів оптоволокна та сучасні технології виготовлення оптичних волокон в промисловості.

Механізм поширення хвиль в волокні. Поширення випромінювання в оптичному волокні, відбувається завдяки повному внутрішньому відбиттю випромінювання на межі більш щільного та менш щільного середовищ, відповідно з більшим та меншим показниками заломлення.

Під час відбиття світлової хвилі від межі серцевини і оболонки частина електромагнітного поля хвилі долає цю межу та швидко згасає у оболонці в поперечному напрямі, але продовжує поширюватись разом з модою волокна вздовж поверхні серцевини. Так себе проявляє оптичний тунельний ефект – подолання частинкою Електромагнітного поля світлової хвилі потенціального бар'єру на межі двох середовищ та створення за потенціальним бар'єром експоненціально спадного еванесцентного поля

Числова апертура волокна. Тільки частина від всіх променів, що попадають на торець волокна, втримується в сердцевині в наслідок повного внутрішнього відбиття. Для таких променів існує максимальний кут падіння на торець волокна  $\theta_{max}$ , за перевищення якого промені світла виходять з сердцевини в навколишнє середовище або оболонку. Числова апертура – синус даного кута:

$$NA = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.1)$$

#### 2.1.1 Багатомодові та одномодові волокна.

За спектром пропускання оптичні волокна поділяють на одномодові та багатомодові. Для аналізу модового складу випромінювання, поширюваного

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у волокні, використовують параметр  $V$ , який за змістом є нормалізованою частотною:

$$V = \frac{\pi d_1}{2\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.2)$$

де  $d_1$  – діаметр сердцевини.

Число мод, поширюваних у ступінчастому волокні, задається співвідношенням

$$Q_m \approx \left(\frac{2}{\pi} V\right)^2 = \left(\frac{d_1}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2). \quad (2.3)$$

У гардієнному волокні з квазіпараболічним профілем показника заломлення чисто поширюваних мод удвічі менше.

Умовою одномодового режиму для волокна є  $V=2,41$ . За одного модового режиму поперечний розподіл інтенсивності випромінювання у волокні описується наближено гауссовою функцією (як і мода резонатора або гауссів пучок одномодового лазера), тому можна ввести поняття радіуса моди ... - відстань від осі волокна, на якій інтенсивність падає в  $e^2$  разів. Для одномодового волокна або основної моди багатомодового волокна радіус моди можна знайти зі співвідношення Маркузе

$$r_{mod} \approx \frac{d_1}{2} (0,65 + 1,62V^{-3/2} + 2,88V^{-6}). \quad (2.4)$$

Часто для порівняння об'ємів, в яких зосереджена основна енергія моди, використовують такий параметр, як ефективна площа моди  $\pi r_{mod}^2$ . Фотоннокристалічні волокна (волокна з фотонною забороненою зоною) можуть мати площу моди понад 1000 мкм<sup>2</sup>, тоді як одномодові волокна, які використовують у лініях зв'язку, мають площу моди менше 100 мкм<sup>2</sup>. Для кожної моди є довжина хвилі відсікання, у разі перевищення якої мода перестане існувати. З наближенням до цієї довжини хвилі радіус моди зростає і все менше енергії моди залишається у сердцевині волокна.

Інколи одномодового режиму можна досягти за допомогою вигинання волокна, оскільки моди вищих порядків мають більші втрати на вигині, ніж основна мода.

Багатомодові волокна мають діаметр серцевини 50 мкм (за європейським стандартом) та 62,5 мкм (за стандартами США та Японії).

Для аналізу поширення випромінювання у багатомодовому волокні можна застосовувати геометричну оптику, тобто використовувати поняття променя. У волокні можна виділити два види променів – меридіональні та косі. Меридіональні промені проходять через вісь волокна, косі промені її не перетинають. Аналіз поширення випромінювання у багатомодових волокнах стосується зазвичай тільки у меридіональних променів, бо урахування косих променів значно ускладнює аналіз. Косі промені можуть вводитися у волокно з кутами падіння, більшими за  $\theta_c$ , але такі промені швидко розсіюються на вигинах та неоднорідностях волокна.

Одномодові волокна мають діаметр серцевини  $d_1 = 7-9$  мкм. Для аналізу поширення випромінювання в одномодовому волокні геометрична оптика виявляється неприйнятною, тому використовують хвильову оптику. [3] [7]

### 2.1.2 Технологія виготовлення оптичних волокон

Матеріали оптичних волокон. Для виготовлення оптичних волокон використовують аморфні, кристалічні та полімерні матеріали (табл. 2.1). Кожний матеріал залежно від конкретного застосування має недоліки та переваги.

Таблиця 2.1

Фізичні властивості матеріалів оптичних волокон

Матеріал	Показник заломлення серцевини $n_c$	Діапазон прозорості $\Delta\lambda$ , мкм	Оптичні втрати $\alpha$ , дБ/км
----------	-------------------------------------	---	---------------------------------

	( $\lambda$ , мкм)		( $\lambda$ , мкм)
<b>Аморфний</b>	1,46 (1,55)	0,2-2	0,2 (1,55)
Кварцове скло ( $\text{SiO}_2$ )			
Фтористе скло(ZBLAN)	1,5 (-)	0,3-4	0,08 (2,9)
Халькогенідне сульфідне ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) скло	2,4 (5,0)	1-6	0,03 (2,4)
Халькогенідне селенідне ( $\text{As}_2\text{Se}_3$ ) скло	2,5 (5,0)	1-9	0,2 (6,5)
<b>Кристалічний</b>	1,77 (-)	0,2-5	0,4 (2,9)
Сапфір ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )			
Фторид літію(LiF)	1,49 (0,65)	0,1-6	<1 (0,65)
Ітрій-алюмогранат (YAG)	1,8 (1,065)	0,2-6	0,3 (1,06)
<b>Полімерний</b>	1,49 (0,54)	0,3-2	1-2 (0,54)
Поліметилметакрилат (ПММА)			
Полістирол	1,59 (0,57)	0,4-0,8	55 (0,65)
Полікарбонат	1,58 (0,67)	0,4-2,1	330 (0,57)
Перфторполімер	1,34 (1,31)	0,2-2	0,4 (0,77)
			16 (1,31)

Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення оптичних волокон є кварцове скло – як оптичне середовище воно має низку цінних властивостей:

- широкий спектральний діапазон прозорості з мінімумом оптичних втрат на довжині хвилі  $\lambda = 1,55$  мкм (втрати за рахунок поглинання та розсіювання становлять 0,2 дБ/км) ;
- На довжині хвилі 1,3 мкм матеріал має нульову дисперсію, що значно зменшує розпливання оптичного імпульсу під час його поширення у волокні;
- високий поріг пробою під дією інтенсивного лазерного випромінювання;
- висока температурна стабільність;
- можливість створити оптоволокно діаметром в декілька мікрометрів;

- важко пошкодити розтягуванням або вигинанням;
- легко зварювати волокнах.

Найдешевший матеріал для оптичних волокон є поліметилетакрилат (ПММА органічне скло, акрилове скло). У видимому діапазоні має оптичні втрати менше 1дБ/м а в інфрачервоному діапазоні втрати різко зростають. Якщо оптичне волокно повинно працювати за високих температур використовують силіконове волокно. Волокно із силіконовою серцевиною діаметром 1,5 мм та оболонкою з фтор-етилен-пропілену діаметром 2,2 мм має числову апертуру 0,65, втрати 1-2дБ/м на  $\lambda=650$  нм та може працювати в температурному діапазоні 250-420К.

Переваги полімерних волокон – низька вартість та механічна гнучкість. Завдяки великому діаметру серцевини їх легко узгоджувати з рпн-фотодіодами. Градієнтні волокна забезпечують високі швидкості передачі даних – до 10 Гбіт/с для ПММА та 47Гбіт/с для перфторполімеру. Недоліками які обмежують використання полімерних волокон є високі оптичні втрати(до 1дБ/м) та мала ефективна ширина смуги частот( 5МГц·км). Також ультрафіолетове випромінювання деградує волокна.

Типи оптичних волокон. Оптичні волокна бувають чотирьох типів:

- Безоболонкові, в яких хвилевідний канал із показником заломлення  $n_1$  межує з навколишнім середовищем, показник заломлення якого  $n_0 < n_1$ ;
- Ступінчасті, в яких серцевина має показник заломлення  $n_1$ , а оболонка -  $n_2$ , причому  $n_1 > n_2$ ;
- Градієнтні, в яких показник заломлення поступово зменшується від осі волокна до його поверхні;
- Фотоннокристалічні, з періодичним розподілом показником заломлення у перерізі волокна.

Виготовляють волокна трьома методами:

1. Витягування волокна з форми у спеціальнів башті заввишки декілька метрів;

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Витягуванням волокна з подвійного тигля;
3. Вичавлюванням волокна з заготовки, подібної до подвійного тигля.

Волокна зі скла виготовляються в більшості першим методом, тому що саме цей метод забезпечує найвищу якість волокна. Із-за того, що вихідні матеріали чисті та не забруднюють тигель, це дозволяє отримувати волокна зі скла з дуже низькими втратами – близько 0,2 дБ/км.

Метод подвійного тигля ґрунтується на одночасному виливанні з більшого тигля розплаву скла оболонки та з меншого тигля, що розміщений в більшому, розплаву скла серцевини. Для того щоб струмінь розплавленого скла серцевини перебував усередині струменя розплавленого скла оболонки, вихідний діаметр більшого тигля має бути в декілька разів більшим за вихідний діаметр меншого тигля.

Екструзійний метод виготовлення волокна найбільш простий, але він найбільше підходить для полімерних волокон, що придатні для передавання інформації на відстані не більше декілька сотень метрів.

## 2.2. Основні параметри та характеристики фотодіодів

Фотодіод – це приймач оптичного випромінювання, який перетворює світло, що потрапляє на його фоточутливу область, в електричний заряд за рахунок процесів в р-п-переході. Такий діод можна розглядати, як напівпровідниковий діод, вольт-амперна характеристика якого залежить від освітленості.

Фотодіод, робота якого заснована на фотовольтаїчному ефекті (поділ електронів і дірок в р- і п-області, за рахунок чого утворюється заряд і ЕРС), називається сонячним елементом. Крім р-п фотодіодів, існують і р-і-п фотодіоди, в яких між шарами р і п знаходиться шар нелегованого напівпровідника і. На відміну від лавинних фотодіодів і фототранзисторів, р-

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

p- і p-i-n-фотодіоди тільки перетворюють світло в електричний струм, але не підсилюють його.

Принцип роботи фотодіодів заснований на тому, що при впливі квантів випромінювання в базі відбувається генерація вільних носіїв, які спрямовуються до границі p-n-переходу. Ширина бази (n-область) така, що дірки не встигають рекомбінувати до переходу в p-область. Струм фотодіода визначається струмом неосновних носіїв - дрейфовим струмом. Швидкодія фотодіода визначається швидкістю поділу носіїв полем p-n-переходу і ємністю p-n-переходу  $C_{p-n}$

Фотодіод може працювати в двох режимах:

- фотогальванічний - без зовнішньої напруги;
- фотодіодний - із зовнішньою зворотною напругою.

Особливості:

- простота структури та технології виготовлення;
- поєднання високої швидкодії та фоточутливості;
- малий опір бази;
- мала інерційність.

Параметри та характеристики фотодіодів:

- чутливість;
- еквівалентна потужність шумів;
- вольт-амперна характеристика;
- спектральна характеристика;
- темновий опір;
- стала часу;
- світлові характеристики;
- інерційність.

Чутливість відображає зміну електричного стану на виході фотодіода при одиничному оптичному сигналі на вході. Щодо кількісної характеристики чутливості, то вона вимірюється відношенням зміни

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричної характеристики на виході фотоприймача, до світлового потоку або потоку випромінювання, що його спровокував.

Струмова чутливість по світловому потоку визначається:

$$S_{i,\Phi_u} = \frac{I_\Phi}{\Phi_u}, \quad (2.5)$$

де  $I_\Phi$  – фотострум,  $\Phi_u$  – світловий потік.

Струмова чутливість по енергетичному потоку визначається:

$$S_{i,E_u} = \frac{I_\Phi}{E_u}, \quad (2.6)$$

де  $E_u$  – енергетичний потік.

Вольтова чутливість по світловому потоку визначається:

$$S_{u,\Phi_e} = \frac{U_\Phi}{\Phi_e}, \quad (2.7)$$

де  $U_\Phi$  – фотонапруга.

Вольтова чутливість по енергетичному потоку визначається:

$$S_{u,E_e} = \frac{U_\Phi}{E_e}. \quad (2.8)$$

Окрім корисного сигналу, на виході фотодіода з'являються сигнали з випадковою амплітудою та спектром – це шуми. Вони перешкоджають виявленню малих за амплітудою корисних сигналів.

Еквівалентна потужність шуму – міра чутливості фотодіода. Вона визначається як такий рівень корисного сигналу, що викликає у фотодіода реакцію як на шум.

Вольт-амперна характеристика – це залежність вихідної напруги від вихідного струму фотодіода.

Спектральна характеристика фотодіода – це залежність фотоструму від довжини хвилі світла, що падає на фотодіод. Якщо хвилі мають велику довжину, вона визначається шириною забороненої зони. Якщо довжини



хвиль малі – великим показником поглинання і збільшення впливу поверхневої рекомбінації носіїв заряду зі зменшенням довжини хвилі квантів світла. Тобто, короткохвильова межа чутливості залежить від товщини бази і швидкості поверхневої рекомбінації. Положення максимуму в спектральній характеристиці фотодіода сильно залежить від росту коефіцієнта поглинання.

Темновий опір – це опір фотодіода за відсутності освітлення.

Стала часу – час за який фотострум після появи або зникнення освітлення змінюється в  $e$  раз (63%) по відношенню до усталеного значення.

Світлові характеристики – це прямо пропорційна залежність фотоструму від освітлення. Це обумовлюється тим, що товщина бази фотодіода значно менша від дифузійної довжини неосновних носіїв заряду. Тобто практично всі неосновні носії заряду, що виникають в базі, беруть участь в утворенні фотоструму.

Інерційність – це реакція фотодіода на зовнішній оптичний сигнал. Затримка реакції фотодіода відбувається через низку фізичних процесів в фотодіоді, що дає різний час насичення відповідних експонент, але наближено можна описати множину процесів однією експонентою:

$$U = U_0 \left( 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right) \right), \quad (2.9)$$

де  $U_0$  – сигнал детектора в насиченні при постійному зовнішньому освітленні,  $t$  – час з моменту вмикання зовнішнього освітлення,  $\tau$  – стала часу.

В р-і-п-структурі і-область розташована між двома областями протилежної провідності. При досить високій напрузі вона пробиває і-область, вільні носії, що з'являються за рахунок фотонів при опроміненні, пришвидшуються електричним полем р-п-переходів. Це дає перевагу у швидкодії та чутливості. Підвищення швидкодії в р-і-п-фотодіоді зумовлено тим, що процес дифузії замінюється дрейфом електричних зарядів в

сильному електричному полі. Уже при  $U_{зв} \approx 0,1$  В р-і-п-фотодіод має перевагу в швидкодії.

Переваги:

1. є можливість забезпечення чутливості в довгохвильовій частині спектру за рахунок зміни ширини і-області;
2. висока чутливість і швидкодія;
3. мала робоча напруга  $U_{роб.}$

Недоліком є складність отримання високої частоти і-області.

Фотодіод Шоткі (фотодіод з бар'єром Шоткі)

Структура метал-напівпровідник. При утворенні структури частина електронів перейде з металу в напівпровідник р-типу.

В структурі лавинного фотодіоду використовується лавинний пробій. Він виникає тоді, коли енергія носіїв енергію перевищує енергію виникнення пар електрон-дірка. Дуже чутливі. Для оцінки існує коефіцієнт лавинного множення:

$$M = \frac{I_{\phi}}{I_{\phi 0}}. \quad (2.10)$$

$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{U}{U_{pr}} \right)^m}, \quad (2.11)$$

Для реалізації лавинного множення необхідно виконати дві умови:

- 1) Електричне поле області просторового заряду повинно бути достатньо великим, щоб на довжині вільного пробігу електрон набрав енергію, більшу, чим ширина забороненої зони:

$$q\lambda = \frac{3}{2} I_g. \quad (2.12)$$

- 2) Ширина області просторового заряду повинна бути суттєво більше, чим довжина вільного пробігу:

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W \gg \lambda \quad (2.13)$$

Значення коефіцієнтів внутрішнього підсилення становить  $M=10-100$  в залежності від типу фотодіодів.

Розглянемо фотодіод з гетеро структурою. Гетероперехід це прошарок, що виникає на межі двох напівпровідників з різною шириною забороненою зоною. Один шар  $p^+$  виконує роль «приймаючого вікна». Заряди генеруються в центральній області. За рахунок підбору напівпровідників з різною шириною забороненої зони можливо перекрити весь діапазоном довжин хвиль. Недолік – складність виготовлення.

### 2.3. Огляд різних типів світлодіодів, порівняння їх якісних характеристик та технологія виготовлення світлодіодів.

В наш час існує велика кількість різноманітних світлодіодів, що різняться матеріалами, технологією виготовлення, сферою використання, тощо. Розглянемо деякі з них.

#### 1. GaAsP-світлодіоди.

Твердий розчин арсенід-фосфіду галію є одним з найкращих електролюмінісцентних матеріалів, який завдяки високій яскравості люмінесценції та можливості використання високопродуктивної газової епітаксії під час вирощування якісних епітаксальних шарів прямозонного та непрямоzonного (за  $x > 0,6$ ) напівпровідників широко використовують для виробництва світлодіодних знакових індикаторів. Кристал прямоzonного арсеніду - фосфіду галію сильно поглинає світло і це дає змогу створювати висококонтрастні матричні індикатори для калькуляторів, годинників, тестерів, а також лінійні шкали для аудіоапаратури.

#### 2. Органічні світлодіоди

Є багато органічних матеріалів, здатних демонструвати яскраву електролюмінесценцію, але проблему на ранніх етапах дослідження цих

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів створювала висока напруга ( близько 100 В) за якої досягалася зовнішня квантова ефективність 5 %; у разі спроби за рахунок використання тонкої органічної плівки зменшити напругу до 30 В відбувався спад ефективності до 0,05 %

Дисплеї на органічних світлодіодах мають ряд переваг перед поширеними у наш час рідкокристалічними дисплеями:

- більша роздільна здатність зображення;
- значно більша яскравість зображення ( до 200 000 кд / м<sup>2</sup> );
- краща передача кольорів;
- у сотні разів більша швидкодія.

### 3. SiC-світлодіоди.

Карбід кремнію – непрямозонний напівпровідник, який у результаті гексагональної модифікації кристалічної решітки 4H-SiC має  $E=3,26\text{eV}$ , а якщо 6H-SiC то  $E=3,03\text{eV}$ . Перевагою цього типу світлодіодів буде висока теплопровідність 390-490 Вт/м·К( в GaAs цей параметр дорівнює 44 Вт/м·К а в Si 150Вт/м·К), висока радіаційна стійкість та можливість працювати за температур до 900 кельвінів, тому цей матеріал є дуже перспективним в електроніці. З цього матеріалу виготовляють жовті  $\lambda=590\text{nm}$  та сині  $\lambda=490\text{nm}$  світлодіоди. Методом рідинної епітаксії на *p*-SiC-підкладці вирощується *p-n*-структура , у якій *p*-шар створюється легуванням SiC алюмінієм, *n*-шар – азотом.

### 4. AlN-світлодіоди.

Нітрид алюмінію серед електролюмінесцентних напівпровідників має найширшу заборонену зону  $E=6.2\text{eV}$ . Цей матеріал дуже перспективний для створення світлодіодів ультрафіолетового діапазону. Дані світлодіоди виготовляються як і GaN-світлодіоди – газовою епітаксією на сапфіровій підкладці.

### 5. Світлодіоди на сполуках типу $A^{II}B^V$ .

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Серед сполук цього типу найбільш перспективними для створення світлодіодів виявилися сульфід цинку  $\text{ZnS}$   $E=3,8\text{eV}$ , селенід цинку  $\text{ZnSe}$   $E=2,7\text{eV}$  і окис цинку  $\text{ZnO}$   $E=3,3\text{eV}$ . Усі ці світлодіоди прямозонні напівпровідники, в яких механізм інжекції реалізований за двома принципами – за допомогою бар'єра Шоткі, або МДН-структури. З  $\text{ZnSe}$  краще створювати МДН- світлодіоди зі структурою  $\text{Au-SiO}_2\text{ZnSe}$ , які можуть працювати при прямому зміщенні  $U<5\text{В}$ .

Світлодіод Шоткі на основі  $\text{ZnO}$  має дуже малу ефективність –  $\mu=10^{-4}\%$ , але він цікавий тим, що випромінює біле світло. Його спектр випромінювання (0,4-1 мкм) охоплює весь видимий діапазон і поширюється навіть на ближню інфрачервону ділянку, причому зі зростанням струму у вихідному випромінюванні збільшується вміст синьо-зеленого випромінювання.

## 2.4 Основні процеси виробництва світлодіодів .

У виробництві світлодіодів використовують такі основні технологічні процеси .

- вирощування напівпровідникових монокристалів (рис. 2.1)

Напівпровідникові монокристали вирощують найчастіше кристалізацією з розплаву – методом Чохральського.



Рис.2.1. – вирощування напівпровідникового монокристалу методом Чохральського.

У кварцевому резервуарі встановлений тигель з тугоплавкого матеріалу, заповненого розплавом тієї речовини яку кристалізують. Тигель нагрівають струмами, що виникають у металі під дією змінного електромагнітного поля, що випромінюється індуктором. Стрижень, на кінці якого міститься затравка(монокристал тієї ж речовини що й розплав), опускається в розплав і повільно обертаючись, піднімається. Так поступово вирощується зливоч монокристалу циліндричної форми. Діаметр зливків може сягати 400мм, довжина 1,5м;

- механічне та хімічне оброблення напівпровідникових пластин ;

Зливки розрізаються алмазними пилами на товщину 0,3-0,5мм, з високою точністю;

- епітаксія

Нарощується монокристалічний шар на монокристалічну підкладку з рідкої або газової сфери, а також за допомогою молекулярного пучка, коли кристалографічні осі нарощеного шару та підкладки збігаються. Механізмом нарощування монокристалічного шару є термохімічна реакція, що протікає у приповерхневому шарі напівпровідника;

- окислення

Окислення кремнію здійснюють за температури 1300-1500К в атмосфері кисню або парів води. Плівка  $\text{SiO}_2$  має аморфну структуру. Двоокис кремнію  $\text{SiO}_2$  зазвичай використовують для створення діелектричного шару або для захисту поверхні від сторонніх впливів.

- дифузію та іонну імплантацію ;

Найпоширеніший метод легування напівпровідників. Підвищення температури приблизно пропорційно збільшує швидкість дифузії. Під час дифузії атоми домішки заповнюють вакансії кристалічної решітки або розміщуються між її вузлами. Наприклад, SiC- світлодіоди легують

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

локальним лазерним опроміненням поверхні напівпровідника, що дозволяє ефективно виводити з газоподібної фази акцепторні домішки бору та алюмінію, а також донорні домішки, зокрема азот.

- протонне опромінення ;

Бомбардування напівпровідникового кристалу високоенергетичними протонами спричиняє порушення кристалічної решітки і як внаслідок зменшення його електровідності.

- фотолітографію
- металізацію

Щоб подати відповідні електричні потенціали на елементи напівпровідникової структури, використовуючи металізацію, на них потрібно нанести контактні площадки. Контакт метал-напівпровідник не має змінювати свій опір зі зміною полярності напруги, тобто має бути не випрямним. Металізацію проводять використовуючи термовакуумне осадження, гальванічним нанесенням, або ін. методами.

- розділення пластин із виготовленими напівпровідниковими структурами на окремі кристали

Після завершення всіх операцій пластину розділяють на невеличкі кристалики – ядра напівпровідникових приладів. Пластини розділяють методом скрайбування, тобто нанесенням горизонтальних та вертикальних рисок сфокусованим лазерним променем. Далі пластину розламують по лініям.

- приєднання виводів

Контактні площадки напівпровідникової структури приєднуються до ніжок за допомогою алюмінієвих чи золотих дрітків з діаметром 30-50 мкм.

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- складання світлодіодів.

Кристал закріплюють на мідній пластині клеєм що добре проводить струм. До мідної пластини приєднують вивід. Мідна пластина виконує роль радіатора, що розсіює тепло що виникає при протіканні струму.

## 2.5. Волоконно оптичні датчики на бреггівських ґратках

За останні двадцять років величезна кількість інновацій в оптоелектроніці і в області волоконно-оптичних телекомунікацій призвела до значного зниження цін на оптичні компоненти і до значного поліпшення їх якості. Це дозволило волоконно-оптичним датчикам перейти з розряду експериментальних лабораторних приладів в розряд широко застосовуваних приладів.

Основою технології волоконно-оптичних вимірювань є оптичне волокно - тонка нитка зі скла, яка пропускає світло через свою серцевину. Оптичне волокно складається з трьох основних компонентів: сердечника, оболонки і покриття. Оболонка відображає розсіяне світло назад в активну зону, забезпечуючи проходження світла через ядро з мінімальними втратами. Це досягається за допомогою більш високого показника заломлення в серцевині по відношенню до оболонки, в результаті чого відбувається повне внутрішнє відбиття світла. Зовнішнє покриття служить буфером для захисту волокна від зовнішніх впливів і фізичних ушкоджень. Воно може включати в себе кілька шарів в залежності від необхідного захисту.

Одним з найбільш часто використовуваних волоконно-оптичних датчиків є датчики на основі волоконно-бреггівських решіток (ВБР) рисунок 3.2. Ґрати в цих датчиках відображають світловий сигнал, спектральна характеристика якого (довжина хвилі) зміщується разом зі зміною вимірюваного параметра (температурою і / або деформацією). При виготовленні решіток всередині

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



сердечника створюється область з періодичною зміною показника заломлення.

Коли широкосмугове світлове випромінювання проходить через бреггівськими ґрати, відбиття від кожного сегмента області зі змінним показником заломлення інтерферують тільки для конкретної довжини хвилі світла, званої довжиною хвилі Брегга ( $\lambda_b$ ), описаної в рівнянні нижче. Це фактично призводить до того, що ВБР відображає певні довжини хвиль (певну частоту) світла і пропускає всі інші.

$$\lambda_b = 2n\Lambda, \quad (2.14)$$

В рівнянні  $n$  - ефективний показник заломлення сердечника оптичного волокна,  $\Lambda$  - відстань між ґратами або період решітки.

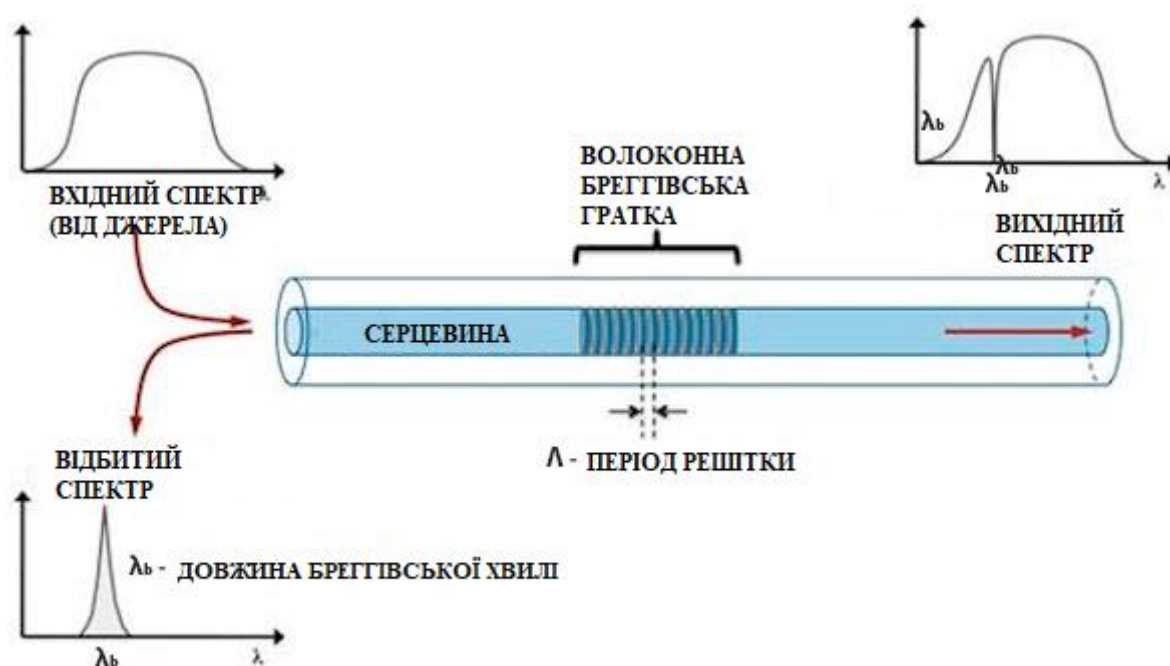


Рис. 3.2. – Схематичне зображення роботи сенсора на бреггівських решітках.

Деформації і зміна температури впливають на ефективний показник заломлення і період решітки, що викликає зміщення довжини хвилі

відбитого сигналу. За зміщенням спектру відбитої хвилі можна вимірювати зміну температури, тиску тощо. [8] [9] [10]

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ЕВЕНЕСЦЕНТНОГО СЕНСОРА ТА РОЗРАХУНОК ЧУТЛИВОСТІ СЕНСОРА

### 3.1 Описання структурної схеми еванесцентного сенсора

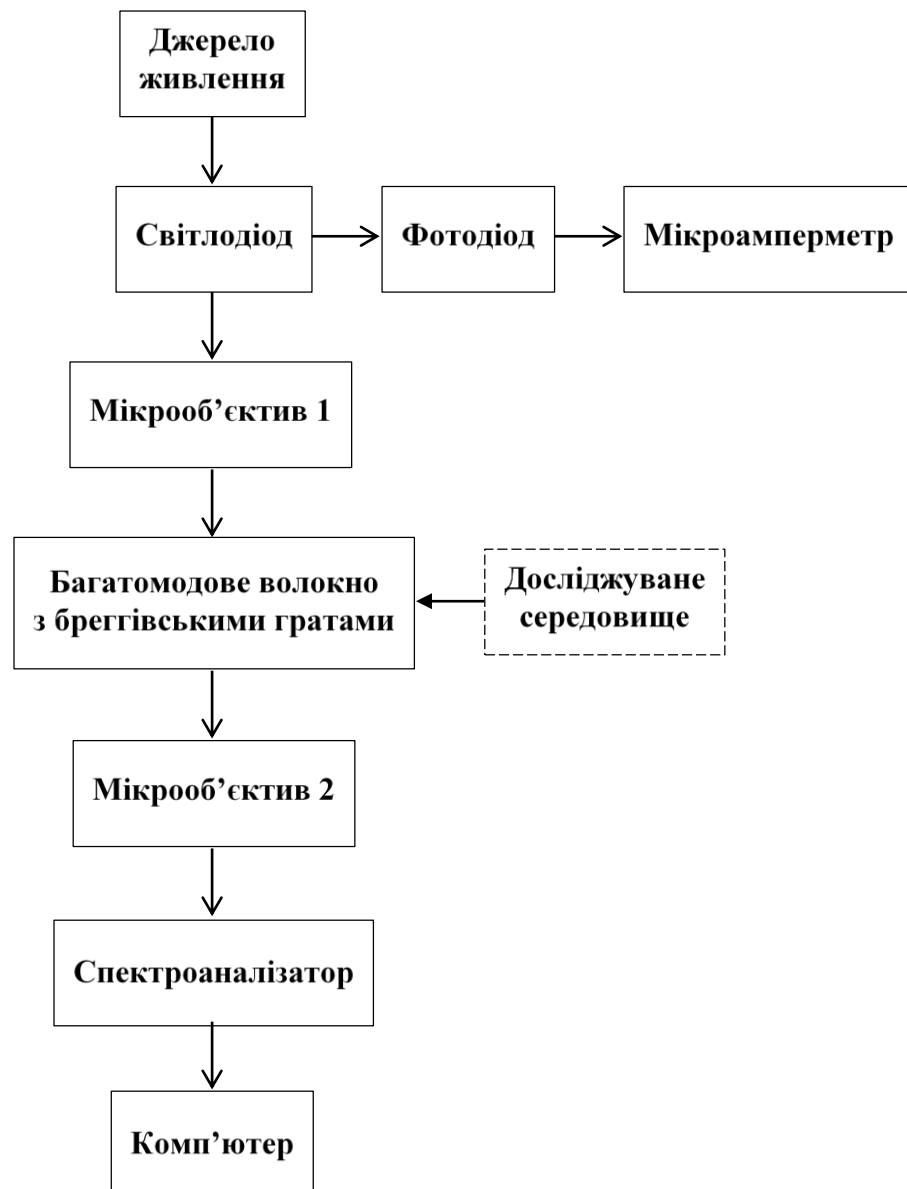


Рис. 3.1 – Структурна схема еванесцентного сенсору.

Розглянемо структурну схему сенсора на основі еванесцентного поля та бреггівських ґраток (рис. 3.1). Основною вимогою до джерела світла є, щоб випромінювання від джерела було широкосмуговим. Це необхідно для того, щоб при впливі на чутливий сенсор ми могли аналізувати зсув відбитого спектра. Тому в даній схемі надано перевагу світлодіоду замість використання лазера. Потужність випромінювання світлодіода контролюється фотодіодом та мікроамперметром.

За допомогою мікрооб'єктива 1 оптичне випромінювання світлодіода фокусується на торці багатомодового оптичного волокна. На відміну від традиційної технології створення бреггівських ґрат в серцевині волокна запропоновано створювати ґрати в середовищі, прилеглому до волокна. Якщо розмістити дифракційні ґрати в області еванесцентного поля волокна, то це буде рівнозначно створенню бреггівських ґрат в оболонці волокна, причому дифракційні ґрати знаходитимуться у частині еванесцентного поля. В іншій частині поля буде досліджуване середовище.

За допомогою мікрооб'єктива 2 оптичне випромінювання з виходу волокна спрямовується на спектроаналізатор, наприклад, спектральну призму та цифрову камеру, під'єднану до комп'ютера.. Спектральна призма розкладатиме пучок світла на промені, які падатимуть на камеру під різними кутами, в залежності від довжини хвилі, утворюючи спектральний розподіл інтенсивності з характерним провалом. Зміна показника заломлення досліджуваного середовища, наприклад, за наявності забруднювачів середовища, призведе до спектрального зсуву спектрального мінімуму, за величиною якого можна знайти концентрацію забруднювача.

### 3.2. Розрахунок чутливості еванесцентного сенсора

Еванесцентний датчик відрізняється від бреггівського тим, що

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бреггівські ґрати створені в ньому не в серцевині волокна, а в його оболонці, де розташовано еванесцентне поле волокна, збудженого оптичним випромінюванням. Ця відмінність може зменшити коефіцієнт відбиття бреггівських ґрат, створених в оболонці, але не повинна впливати на спектральну залежність бреггівського відбиття від зовнішніх факторів. Тому розрахунок чутливості для обох видів сенсорів залишається однаковим.

Для розрахунку чутливості сенсора, наприклад, до температури скористаймося формулою:

$$\Delta\lambda_{Br} = 2\left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT}\right)\Delta T,$$

звідки чутливість може подана як

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_{Br}}{\Delta T} = 2\left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT}\right).$$

Позначаючи температурний коефіцієнт показника заломлення кварцового скла як  $\alpha_T$ , перепишемо формулу у вигляді

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_{Br}}{\Delta T} = 2\Lambda\left(\frac{dn}{dT} + n\alpha_T\right).$$

Параметри для розрахунку:

- показник заломлення серцевини кварцового волокна  $n = 1.48$ ;
- залежність показника заломлення від температури  $dn/dT = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;
- лінійний коефіцієнт температурного розширення кварцового скла  $\alpha_T = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;
- період бреггівських ґрат  $\Lambda = 0,1 \text{ мм}$ .

Підставляючи ці дані в останню формулу, розрахуємо чутливість сенсора до температури:

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_{Br}}{\Delta T} = 2 \cdot 10^{-4} (1,28 \cdot 10^{-5} + 1,48 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7}) = 2,72 \cdot 10^{-9} \text{ м/К} = 2,72 \text{ нм/К}.$$

Як бачимо, чутливість сенсора пропорційна періоду бреггівських ґрат. але висока чутливість непотрібна у разі використання на одному волокні множини ґрат з різним періодом, тому що спектри бреггівського розсіяння різних ґрат почнуть перекриватися і неможливо буде їх розрізнити. Декілька ґрат на одному волокні бувають потрібні, якщо необхідно контролювати фізичні величини одночасно у декількох просторово рознесених точках.

Зробімо розрахунок необхідної чутливості для  $N = 10$  бреггівських ґрат, розташованих вздовж оптичного волокна. якщо ширина спектра джерела випромінювання становить  $\Delta\lambda_{LED} = 200 \text{ нм}$ , а температурний діапазон роботи сенсора становить  $\Delta T_{sens} = 100 \text{ К}$ . Шукана чутливість може бути знайдена із умови неперекриття спектральних діапазонів розсіяння бреггівських ґрат:

$$\Delta\lambda_{LED} = NS_T \Delta T,$$

звідки

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_{LED}}{N \Delta T_{sens}}.$$

Підставляючи числові значення, знайдемо

$$S_T = \frac{200}{10 \cdot 100} = 0,2 \text{ нм/К}.$$

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновок

В даній роботі було розглянуто різні види еванесцентних сенсорів, які використовуються в нинішній час, або які є перспективними для розробки. Також досліджено основні проблеми мікроскопії ближнього поля що обмежують розвиток цього напрямку в мікроскопії. Показаний процес утворення еванесцентних хвиль в оптичному волокні, що лягло в основу розробки власного сенсора еванесцентного поля.

В другому розділі роботи розглянуті ключові елементи структурної схеми розроблюваного сенсора, такі як: світлодіод – джерело широкосмугового оптичного випромінювання, оптичне волокно, як основний носій випромінювання, на яке нанесені бреггівські ґратки для чутливості до температури, атмосферного тиску, розтягування тощо, та фотодіод, що слугує для контролю потужності випромінювання в схемі.

В третьому розділі розглянута структурна схема сенсора на основі еванесцентних хвиль та бреггівських решіток. Вибрано основні параметри сенсора та розраховано чутливість його до зміни температури.

					БР.6.050802.051.006 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Бурик І.П., "studopedia.ru" 21.01.2018. с. 15. Available:  
[https://studopedia.ru/19\\_385329\\_rozdil--printsip-roboti-skanuyuchogo-optichnogo-mikroskopa-blizhnogo-polya.html](https://studopedia.ru/19_385329_rozdil--printsip-roboti-skanuyuchogo-optichnogo-mikroskopa-blizhnogo-polya.html).
- [2] Антонюк В.С., Мікроскопія в нанотехнологіях, Київ: 2014, с. 110.
- [3] Чадюк В.О., Оптоелектроніка від мікро до нано, частина друга, Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2019, с. 333.
- [4] Гауер Дж., Оптические системы связи, 1989, с. 501.
- [5] Голдаєвич Є.Є., «Ближнє поле та його застосування для надщільного запису інформації,» Київ, 2004.
- [6] Ханцперджер Р., Інтегральна оптика, Москва: Мир, 1985, с. 351.
- [7] Чадюк В.О., Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання книна перша, Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2018, с. 318.
- [8] Gholamzadeh B., «Fiber Optic Sensors,» с. 11, 2008.
- [9] Tao A., «Multifunctional Nanowire Evanescent Wave Optical Sensors,» *Advanced materials*, с. 61-66, 2006.
- [10] Бабин С. А., «Волоконно-оптичні сенсори на основі бреггівських решіток,» "Нанопотоніка", с. 35-37, 2008.
- [11] Чадюк В.О., Оптоелектроніка від макро до нано: Генерация оптичного випромінювання, Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2012, с. 378.
- [12] Казанцев Д. В., «Безапертурная микроскопия ближнего оптического поля,» *УФН*, с. 277–295, 2017.
- [13] Осадько И.С., «Микроскоп ближнего поля как инструмент для исследования наночастиц,» *УФН*, с. 83-87, 2017.
- [14] Лазарев В.А., Быстродействующая система измерения деформации и температуры на основе волоконно-оптических брегговских датчиков, 2013, с. 185.
- [15] Арсланов Н.М., Нанооптика ближнеполевой микроскопии: эффекты распространения светового поля в свужающемся субволновом зонде,



Казань, 2006, с. 126.

					<i>БР.6.050802.051.006 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		